

# APPAREIL DE MESURE DE ROTATION A RESONATEUR MECANIQUE VIBRANT

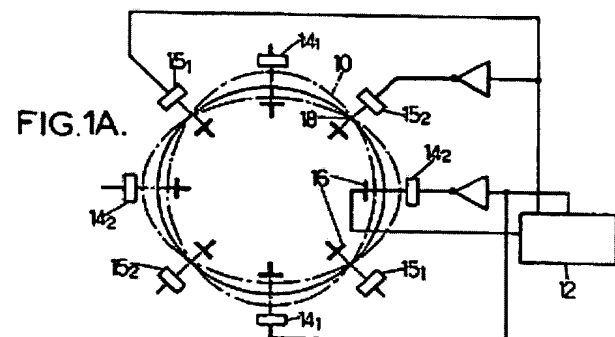
**Patent number:** FR2755227  
**Publication date:** 1998-04-30  
**Inventor:** JEANROY ALAIN; RENAULT ALAIN; LEGER PIERRE  
**Applicant:** SAGEM (FR)  
**Classification:**  
- **international:** G01C19/56; G01P9/04; G01P15/14  
- **europaean:** G01C19/56P  
**Application number:** FR19960013344 19961031  
**Priority number(s):** FR19960013344 19961031

**Also published as:**

GB2319085 (A)  
DE19748294 (A1)

Abstract not available for FR2755227  
Abstract of correspondent: **DE19748294**

A mechanical resonator 10 provided with transducers 15 1 and 15 2 enables an axially-symmetrical standing wave to be set up in the resonator. The apparatus also comprises sensors 16 for measuring the elongation of the resonator vibration in at least two particular directions and a monitoring and control circuit 12 for sustaining the vibrations and for determining the locations of the vibration nodes and anti-nodes. The monitoring and control circuit powers the transducers to generate two contra-rotating travelling waves in the resonator with the phase difference between them being representative of the angle of rotation of the resonator about its axis of revolution. The



19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

11 N° de publication :

(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

2 755 227

21 N° d'enregistrement national :

96 13344

51 Int Cl<sup>8</sup> : G 01 C 19/56, G 01 P 9/04, 15/14

12

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 31.10.96.

30 Priorité :

43 Date de la mise à disposition du public de la  
demande : 30.04.98 Bulletin 98/18.

56 Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du  
présent fascicule.*

60 Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

71 Demandeur(s) : SAGEM SOCIETE ANONYME — FR.

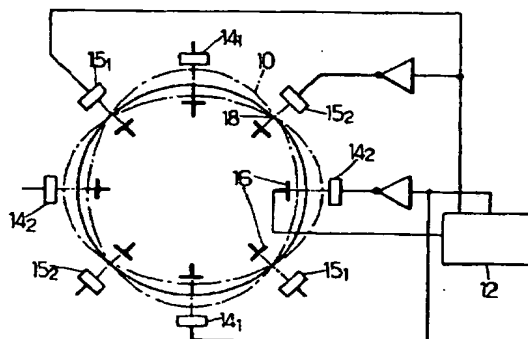
72 Inventeur(s) : LEGER PIERRE, JEANROY ALAIN et  
RENAULT ALAIN.

73 Titulaire(s) :

74 Mandataire : CABINET PLASSERAUD.

### 54 APPAREIL DE MESURE DE ROTATION A RESONATEUR MECANIQUE VIBRANT.

57 L'appareil de mesure de rotation comprend un résonateur mécanique (10) muni de transducteurs (15<sub>1</sub>, 15<sub>2</sub>) permettant de créer dans le résonateur une onde stationnaire de vibration ayant une symétrie axiale et de capteurs de mesure de l'élongation de la vibration du résonateur dans au moins deux directions particulières. Il comprend de plus un circuit de contrôle/commande pour entretenir les vibrations et déterminer les emplacements des noeuds et des ventres de vibration. Le circuit de contrôle/commande alimente les transducteurs pour générer dans le résonateur deux ondes progressives contra-rotatives, dont la différence de phase est représentative de l'angle de rotation du résonateur autour de son axe de révolution. Les amplitudes des ondes sont telles que leur composition provoque une onde stationnaire ayant une amplitude en phase déterminée et une amplitude en quadrature sensiblement nulle.



FR 2 755 227 - A1



# APPAREIL DE MESURE DE ROTATION A RESONATEUR MECANIQUE VIBRANT

5 La présente invention concerne de façon générale les appareils de mesure de rotation comprenant :

- un élément mécanique, appelé résonateur, possédant une symétrie axiale, dont l'axe est l'axe sensible de l'appareil, capable de vibrer sur une résonance mécanique,
- des capteurs sensibles à l'élongation de la vibration
- 10 dudit élément dans au moins deux directions particulières,
- et des transducteurs d'application de forces au résonateur dans lesdites directions particulières, servant notamment au contrôle de la vibration.

15 Il existe déjà de nombreux appareils à résonateurs de ce type, dits vibrants ; ils utilisent l'accélération de Coriolis, qui agit sur un élément en vibration lorsque ce corps tourne. L'accélération de Coriolis est dirigée orthogonalement à la vitesse de rotation et à la direction de vibration, et elle tend à modifier l'orientation du

20 réseau de vibration proportionnellement à la rotation dudit élément autour de l'axe sensible.

De tels appareils utilisent des résonateurs qui peuvent prendre des formes notablement différentes les unes des autres. Le résonateur peut avoir une constitution annulaire ; il peut être constitué par une plaque circulaire ou carrée ; il peut avoir une forme de bol fixé par son fond, les capteurs et les transducteurs étant alors répartis

25 autour du bord du bol ; il peut également comporter un jeu de quatre poutres vibrantes réparties aux angles d'un carré (EP-A-0 578 519).

30

On sait par ailleurs, depuis 1923 au moins, qu'on peut considérer une onde stationnaire dans un résonateur ayant une symétrie axiale comme la composition de deux ondes progressives contra-rotatives de même longueur d'onde. Cette

35 possibilité est mise en oeuvre dans les gyromètres optiques

à boucle (gyromètres laser). Les deux ondes contra-rotatives voient leur phase changer lorsque le résonateur tourne autour de son axe sensible.

On a également proposé d'utiliser cette décomposition dans le cas d'appareils ayant un résonateur en anneau (EP-A-609 929) ou à ondes de surface cylindriques (US-A-4 384 409). Toutefois, les appareils prévus jusqu'à ce jour exigent des circuits effectuant des calculs complexes et/ou un grand nombre de transducteurs.

Jusqu'à ce jour également, ces calculs et la disposition des transducteurs et capteurs étaient conjointement adaptés à un type de résonateur et à un seul. Par exemple, le résonateur en anneau objet du brevet EP-A-609 929 déjà cité est commandé par des transducteurs selon des directions particulières relativement aux directions des capteurs, et pour un mode de vibration  $n$  égal à 2, ce qui exclut l'utilisation de l'électronique de contrôle/commande du résonateur pour un autre mode de vibration ou pour un autre type de résonateur.

L'invention vise notamment à s'affranchir de ces contraintes.

On sait que, dans le cas d'une résonance mécanique d'un résonateur quelconque, il est possible de représenter analytiquement un champ de vibration dans une base ayant deux modes propres pour références. On peut alors décrire la vibration par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \ddot{\eta}_1 + 2\xi_1 \dot{\eta}_1 + \omega_1^2 \eta_1 = 2\alpha_1 \Omega_{b/i} \dot{\eta}_2 + \frac{f_1}{m_1} \\ \ddot{\eta}_2 + 2\xi_2 \dot{\eta}_2 + \omega_2^2 \eta_2 = -2\alpha_2 \Omega_{b/i} \dot{\eta}_1 + \frac{f_2}{m_2} \end{cases}$$

dont la solution est une description de la vibration.

Dans ces équations :

$\eta_i$  (avec  $i=1$  ou  $2$ ) : coordonnées dans le plan des modes propres,

$\xi_i$  : coefficients d'amortissement modal réduit,  
 $m_i$  : masses modales,  
 $\omega_i$  : pulsations propres,  
 $\alpha_i$  : coefficients de couplage gyroscopiques,  
 $\Omega_{b/i}$  : vitesses de rotation inertielles du résonateur,  
 $f_i$  : efforts généralisés.

On exploite ces relations en plaçant des transducteurs et des capteurs de façon que :

- les capteurs donnent les composantes des deux vibrations selon les axes  $\eta_1$  et  $\eta_2$ ,

- les transducteurs permettent d'appliquer les forces  $f_1$  et  $f_2$  selon les mêmes axes.

La position et le nombre des capteurs et transducteurs dépendront de la forme du résonateur et leur association peut toujours permettre d'obtenir des sorties  $\eta_1$  et  $\eta_2$  et d'admettre des entrées  $f_1$  et  $f_2$  selon la figure 1 et d'utiliser l'électronique de contrôle/commande proposée sur cette figure, qui reste indépendante de la forme du résonateur et qui ne nécessite plus qu'une adaptation à la fréquence de résonance utilisée.

On observe que, mécaniquement, les axes  $\eta_1$  et  $\eta_2$  présentent un angle égal à  $\pi/2n$ ,  $n$  étant un entier supérieur ou égal à un. Par exemple, pour un anneau se déformant en ellipse,  $n=2$  et les deux ondes propres font un angle de  $\pi/4 = 45^\circ$ .

L'invention exploite pour la première fois ces principes et équations pour arriver à fournir un module électronique qu'on peut qualifier d'universel, permettant le contrôle/-commande de résonateurs mécaniques à symétrie axiale de tous types suivant tous modes de vibration utiles, dans le but de délivrer un angle ou une vitesse de rotation suivant leur

axe sensible.

Par module universel, on entendra un module qu'il n'est pas nécessaire de modifier si l'on change de mode ou de résonateur, seuls les transducteurs et capteurs devant être  
5 adaptés en ce qui concerne leurs niveaux de sortie ou de sensibilité et positionnés relativement au résonateur suivant le référentiel mécanique correspondant au mode de résonance choisi.

La présente invention vise également à fournir un  
10 appareil de mesure de rotation du genre ci-dessus défini permettant de ne mettre en oeuvre qu'un nombre minimum de transducteurs et de capteurs et une électronique relativement simple, pouvant être entièrement analogique. Dans ce but, l'invention propose un appareil caractérisé en ce que  
15 le circuit d'entretien des vibrations et de mesure comporte des moyens d'alimentation des transducteurs destinés à générer dans le résonateur deux ondes progressives contra-rotatives, dont la différence de phase est représentative de l'angle de rotation du résonateur autour de son axe de  
20 révolution et dont les amplitudes sont telles que leur composition provoque une onde stationnaire ayant une amplitude en phase déterminée et une amplitude en quadrature sensiblement nulle.

Grâce au maintien de l'amplitude en phase à une valeur  
25 déterminée obtenue par exemple en régulant l'énergie des ondes contra-rotatives, et à l'annulation de l'amplitude en quadrature, il est possible d'avoir un nombre relativement réduit de transducteurs. La régulation peut être assurée en ne mettant en oeuvre que des éléments de calcul implémenta-  
30 bles sans difficulté sous forme d'un circuit câblé, sans microprocesseur, du fait notamment que le calcul de fonctions trigonométriques n'est qu'optionnel.

L'appareil peut aisément être réalisé de façon à  
constituer aussi bien un gyroscope qu'un gyromètre. Pour  
35 l'utilisation en gyromètre, l'onde stationnaire est mainte-

nue en place en provoquant sa précession forcée. Dans le cas d'utilisation en gyroscope, des moyens destinés à un fonctionnement en gyromètre ne sont pas nécessaires, mais ils permettent d'effectuer un calibrage périodique, d'où une précision qui peut être élevée.

Les caractéristiques ci-dessus ainsi que d'autres apparaîtront mieux à la lecture de la description qui suit d'un mode particulier de réalisation, donné à titre d'exemple non limitatif. La description se réfère aux dessins qui l'accompagnent, dans lesquels :

- la figure 1 est un schéma synoptique destiné à montrer le mode de contrôle/commande du dispositif, à module universel ;

- la figure 1A est un schéma de principe montrant une répartition possible de transducteurs sur un résonateur à périphérie circulaire au repos, les liaisons des capteurs et des transducteurs avec un circuit de mesure et d'excitation et un réseau d'ondes stationnaires provoquées dans le résonateur selon un mode d'ordre deux ;

- la figure 2 est une représentation de la vibration d'un point du résonateur de la figure 1, dans un référentiel  $\eta_1, \eta_2$  se rapportant au mode ;

- la figure 3 est un synoptique de moyens de mesure de déphasage et d'annulation de déphasage, utilisable pour la mise en oeuvre de l'invention ;

- la figure 4 est un synoptique montrant des opérateurs utilisables pour maintenir les amplitude des ondes contrarotatives dans un résonateur ;

- la figure 5 est un synoptique d'opérateurs utilisables pour générer un signal représentatif des forces à appliquer pour provoquer une précession ;

- la figure 6 est un synoptique d'ensemble de l'électronique d'un appareil de mesure de rotation suivant l'invention, pouvant fonctionner en gyromètre ou en gyroscope.

Avant de décrire en détail la mise en oeuvre de l'inven-

tion, il peut être utile de rappeler que le réseau d'ondes stationnaires d'ordre  $n$  (d'ordre deux dans l'exemple qui sera donné) est décomposable en deux ondes progressives. Dans le cas d'un résonateur en anneau, lorsque le résonateur tourne autour de son axe, la rotation tend à entraîner le réseau d'ondes stationnaires. Cela se traduit par le fait que les deux ondes progressives permettant de recomposer l'onde stationnaire ont une différence de fréquence  $\omega_1 - \omega_2$  représentative de la vitesse de rotation  $\Omega$  et une différence de phase représentative de l'angle de rotation à partir d'une origine.

L'invention applique ce fait en associant, à des capteurs de mesure de l'élongation du résonateur en plusieurs emplacements autour de l'axe et à des transducteurs de création de forces de compensation de l'amortissement, une électronique fournissant deux signaux de sortie à des fréquences dont la différence est représentative de la vitesse de rotation (et dont la différence de phase est représentative de l'angle) et alimentant les transducteurs de façon à créer des forces qui :

- maintiennent l'amplitude de vibration en phase à une valeur constante ;
- annulent la composante en quadrature.

Le résonateur mécanique peut avoir des constitutions très variées. A titre d'exemple, la figure 1A montre un résonateur 10 qui peut notamment être en forme de disque ou de bol en un matériau tel que le résonateur ait de faibles pertes. Au repos, le résonateur est circulaire ou présente une structure qui mécaniquement est équivalente à un cercle comme cela est représenté en traits pleins sur la figure 1A. Lorsque le résonateur vibre dans son mode d'ordre 2, il prend les deux formes extrêmes représentées, en traits mixtes et à échelle très agrandie sur la figure 1A, s'il est excité à sa fréquence de résonance par un circuit électronique 12 qui alimente en opposition de phase deux transduc-



teurs 14 placées à  $90^\circ$  l'une de l'autre. Dans la réalité, chaque transducteur 14 est alimenté en parallèle avec un transducteur placé en face, non représenté pour plus de simplicité. Deux autres couples d'électrodes  $15_1$ ,  $15_2$  sont placées à  $45^\circ$  des précédentes dans le référentiel des modes.

Le déplacement radial est mesuré, dans le cas décrit, aux mêmes emplacements angulaires que les transducteurs. Pour cela, deux couples par exemple de capteurs 16 (les liaisons d'un seul capteur étant seules représentées) permettent de mesurer l'amplitude de la vibration et fournissant au circuit électronique 12 des signaux de mesure. Le circuit est prévu pour alimenter les transducteurs de façon à maintenir une amplitude de vibration constante, comme on le verra plus loin.

Ces indications et les suivantes seraient également valables pour tout résonateur mis en vibration suivant un mode d'ordre  $\geq 1$ , la disposition des transducteurs et des capteurs étant simplement modifiée.

Ainsi le même dispositif 12 peut être utilisé pour un résonateur à quatre poutres vibrantes parallèles, tel que celui décrit dans le document EP-A-0 578 519 déjà mentionné.

Si le boîtier qui supporte le résonateur tourne dans le sens indiqué par la flèche  $\Omega$  d'un angle déterminé, le champ de vibrations tend à se décaler, sous l'effet des forces de Coriolis, et par exemple le noeud de vibrations 18 se déplace, s'il n'est pas contrarié par une action du circuit électronique 12, et prend par exemple un angle  $\theta$  à un instant  $t$ . Cet angle est proportionnel à la rotation subie par le boîtier, avec un rapport constant et inférieur ou égal à 1, suivant le type de résonateur.

Quelle que soit la nature du résonateur mécanique, dans la mesure où il présente un mode de vibration stationnaire, d'ordre 1 au moins, le déplacement d'un point M peut être représenté, dans un référentiel de modes  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ , par le diagramme de la figure 2. Le déplacement d'un point courant

M peut être représenté sous la forme paramétrique donnée plus haut. Par la suite, on développera ces formules en utilisant les notations suivantes :

$\eta_1$  et  $\eta_2$  : axes du référentiel et coordonnées dans le référentiel,

$\omega$  est la fréquence angulaire de vibration du résonateur,

$\Omega$  est la vitesse de rotation du boîtier,

$\alpha$  est un coefficient de forme, inférieur à 1.

$f_1$  et  $f_2$  : forces appliquées le long des axes  $\eta_1$  et  $\eta_2$ , destinées en premier lieu à compenser les pertes et à corriger l'anisotropie de fréquence et en second lieu à changer de mode de fonctionnement ou à corriger le fonctionnement en utilisant des modèles d'erreur mémorisés,

M : point courant représentatif de l'état de vibration,

$\omega_1$  et  $\omega_2$  : fréquences angulaires des deux ondes progressives résultant de la décomposition de l'onde stationnaire à fréquence angulaire  $\omega$ ,

$\theta$  : inclinaison du grand axe de l'ellipse représentative de la vibration dans le plan des modes, dans des axes de référence  $\eta_1$  et  $\eta_2$  liés au boîtier du résonateur,

$\vec{\eta}$  ou  $\vec{R}$  : vecteur représentatif du point courant M dans le repère  $\eta_1, \eta_2$ ,

2a et 2b : grand et petit axes de l'ellipse représentative de la vibration,

VCO<sub>1</sub> et VCO<sub>2</sub> : oscillateurs à commande par tension, fonctionnant aux fréquences  $\omega_1$  et  $\omega_2$ ,

$\vec{R}_1$  et  $\vec{R}_2$  : vecteurs, de modules respectifs  $r_1$  et  $r_2$ , tournant respectivement aux fréquences  $\omega_1$  et  $\omega_2$ ,

$ft_1$  et  $ft_2$  : forces tangentielles exercées sur le résonateur, pour entretenir les amplitudes en phase à une valeur constante,

$fr_1$  et  $fr_2$  : forces radiales exercées sur le résonateur, pour annuler les amplitudes en qua-

drature,

$\Omega$  : vitesse de rotation du boîtier du résonateur,  
 $\Omega_p$  : vitesse de précession, égale à  $(\omega_1 - \omega_2)/2$ ,  
 $C_p$  : signal de commande de précession.

5 La figure 2 montre que la vitesse de rotation  $\Omega$  du boîtier qui porte le résonateur a pour effet de faire tourner le champ de vibrations et, par exemple, de faire tourner d'un angle  $\theta$  le grand axe  $2a$  de l'ellipse représentant le mouvement du point. Pour un fonctionnement en  
 10 gyroscope ; on déduit, d'une mesure de  $\theta$ , l'angle dont a tourné le boîtier du résonateur en appliquant un facteur d'échelle  $\alpha$  qui dépend du résonateur et de l'ordre du mode.

Sur la figure 2, on a représenté la vibration sous forme d'une ellipse ayant un grand axe de valeur  $2a$  et un petit  
 15 axe de valeur  $2b$ . Les variations des coordonnées  $\eta_1$  et  $\eta_2$  d'un point courant  $M$  en fonction du temps peuvent s'écrire :

$$\eta_1 = a \cos \omega t \cos \theta - b \sin \omega t \sin \theta$$

$$\eta_2 = a \cos \omega t \sin \theta + b \sin \omega t \cos \theta$$

La composante de vibration d'amplitude  $b$ , souvent  
 20 dénommée quadrature spatiale, provoque l'apparition de dérives parasites du champ de vibrations, qui dégradent la qualité des mesures lors du fonctionnement en gyroscope.

Conformément à l'invention, deux commandes pour l'entretien de la vibration sont prévues dans tous les cas pour :

- 25 - maintenir l'amplitude de  $a$  (ou de  $a^2 + b^2$ , c'est-à-dire de l'énergie) par compensation des pertes ;  
 - réduire la quadrature spatiale  $b$  à zéro.

De plus, pour un fonctionnement en gyromètre ou en vue du calibrage, une troisième commande est nécessaire :

- 30 - commande externe de précession pour faire tourner l'axe de la vibration d'une vitesse de précession  $\Omega_p$  qui sera définie plus loin.

Pour faire apparaître la décomposition en deux ondes progressives de fréquences différentes  $\omega_1$  et  $\omega_2$ , il suffit  
 35 de relever que le vecteur  $\vec{OM}$  peut être regardé comme la

résultante de  $\vec{R}_1 + \vec{R}_2$ , le vecteur  $\vec{R}_1$  de rayon  $r_1 = (a+b)/2$  tournant à la vitesse  $+\omega$  et le vecteur  $\vec{R}_2$  de rayon  $r_2 = (a-b)/2$  tournant à la vitesse  $-\omega$  lorsque le boîtier est fixe.

Si en revanche le boîtier tourne à vitesse  $\Omega$ , les vitesses des vecteurs  $\vec{R}_1$  et  $\vec{R}_2$  deviennent  $\omega_1 = \omega - \Omega$  et  $\omega_2 = \omega + \Omega$ .

L'entretien de la vibration peut s'effectuer en commandant deux oscillateurs fournissant chacun deux signaux alternatifs en quadrature de façon que leurs sorties, appliquées aux électrodes, reconstituent deux vecteurs tournant aux fréquences  $\omega_1$  et  $\omega_2$ . Les vecteurs  $\vec{V}_1$  et  $\vec{V}_2$  représentatifs des sorties des deux oscillateurs commandés VCO<sub>1</sub> et VCO<sub>2</sub> doivent être asservis en position à  $\vec{R}_1$  et  $\vec{R}_2$ . Cela implique de mesurer ou de calculer le déphasage entre  $\vec{R}_1$  et  $\vec{V}_1$  et entre  $\vec{R}_2$  et  $\vec{V}_2$ .

#### Mesure et annulation de déphasage

Pour mesurer le déphasage, il est proposé d'utiliser la propriété du produit vectoriel d'être nul lorsque les deux vecteurs sont alignés. Dans le cas du vecteur  $\vec{V}_1$  :

$$\begin{aligned}\vec{V}_1 \wedge \vec{OM} &= \vec{V}_1 \wedge (\vec{R}_1 + \vec{R}_2) \\ &= \vec{V}_1 \wedge \vec{R}_1 + \vec{V}_1 \wedge \vec{R}_2\end{aligned}$$

Le terme  $\vec{V}_1 \wedge \vec{R}_2$  donne après filtrage, un signal nul car les vecteurs  $\vec{V}_1$  et  $\vec{R}_2$  tournent en sens contraire, d'où :

$\vec{V}_1 \wedge \vec{OM} = \sin(\vec{V}_1, \vec{R}_1) = \arg(\vec{V}_1, \vec{R}_1) = \xi_1$ , avec  $\xi_1$  signal d'erreur, ou :

$$\vec{V}_1 \wedge \vec{OM} = \eta_2 \cdot \cos \omega_1 t - \eta_1 \cdot \sin \omega_1 t$$

A condition d'utiliser des oscillateurs fournissant des signaux carrés d'amplitude 1, l'opération de multiplication s'effectue simplement à l'aide de multiplieurs par +1 et -1 et un additionneur qui, les signaux étant analogiques, peut être un amplificateur opérationnel. Un montage identique est utilisé pour la seconde voie.

Les moyens de mesure du déphasage et d'annulation du déphasage peuvent en conséquence être ceux montrés en figure 3. L'entrée  $\eta$  désigne l'ensemble des signaux représentant le vecteur  $\vec{OM} = \vec{R}_1 + \vec{R}_2$ .

5 Les composants  $20_1$  et  $20_2$  effectuent les produits vectoriels, en fait des multiplications des valeurs d'entrée alternativement par +1 et -1 et des additions, suivies d'un filtrage. Les signaux d'erreur  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$  sont rebouclés sur  $VCO_1$  et  $VCO_2$ .

10 On obtient ainsi deux sorties  $22_1$  et  $22_2$  dont les phases sont asservies aux deux vecteurs  $\vec{R}_1$  et  $\vec{R}_2$  qui composent la vibration elliptique, et dont le déphasage correspond à  $2\theta$ .

15

#### Mesure et régulation des amplitudes des deux ondes

L'amplitude de chacune des deux ondes contra-rotatives est mesurée en effectuant un produit scalaire au lieu d'un produit vectoriel. On peut pour cela utiliser deux opérateurs  $24_1$  et  $24_2$ , comme schématisé sur la figure 4.

L'équation algébrique reste du type à deux multiplications de grandeurs réelles et une addition requérant deux modulateurs et un additionneur algébrique.

25 Si on suppose que les  $VCO_1$  et  $VCO_2$  fournissent des signaux d'amplitude égale à 1, on a, pour  $24_1$  :

$$\begin{aligned}\vec{V}_1 \cdot \vec{OM} &= \vec{V}_1 \cdot (\vec{R}_1 + \vec{R}_2) \\ &= \vec{V}_1 \cdot \vec{R}_1 + \vec{V}_1 \cdot \vec{R}_2 \\ &= r_1 \cdot \cos(\vec{V}_1, \vec{R}_1) + r_2 \cos(\vec{V}_1, \vec{R}_2)\end{aligned}$$

30 Après filtrage, le résultat correspond à  $r_1$  ;  $r_2$  est obtenu de la même façon ; on dispose donc :

- des 2 composantes  $\eta_1$  et  $\eta_2$  du vecteur  $\vec{OM}$ ,
- des deux fois 2 composantes des vecteurs tournants  $\vec{R}_1$  et  $\vec{R}_2$ .

35 On peut alors maintenir à une valeur de consigne

l'amplitude de chacune des deux ondes contra-rotatives, en envoyant des forces d'entretien  $f_t$  normales aux vecteurs  $\vec{R}$ , c'est-à-dire tangentes aux trajectoires circulaires. Ces forces de compensation doivent être égales et opposées aux forces d'amortissement induites par le vecteur vitesse.

Le principe de l'asservissement est montré sur la figure 4. Les valeurs  $r_1$  et  $r_2$  sont introduites dans des additionneurs 26<sub>1</sub> et 26<sub>2</sub> et comparées à des consignes  $r_{01}$  et  $r_{02}$ . Les sorties des additionneurs sont amplifiées avec un gain  $k$  en 28<sub>1</sub> et 28<sub>2</sub> et envoyées à des multiplieurs 30<sub>1</sub> et 30<sub>2</sub> effectuant de simples multiplications. La rotation des vecteurs  $\vec{V}_1$  et  $\vec{V}_2$  avant envoi aux multiplieurs s'effectue en 32<sub>1</sub> et 32<sub>2</sub> par simple inversion des coordonnées et éventuellement changement de signe.

#### Annulation de la quadrature

Cette annulation est simple. Il suffit de donner la même valeur  $r_0$  aux consignes  $r_{01}$  et  $r_{02}$  d'asservissement des deux amplitudes. En effet,  $b = r_1 - r_2$ .

#### Commande de précession

La commande de précession est nécessaire lors du fonctionnement en gyromètre et/ou pour un calibrage. Elle doit faire apparaître une précession  $\Omega_p$  du gyroscope et pour cela :

- augmenter la vitesse  $\omega_1$  de  $\vec{R}_1$  d'une quantité  $\Omega_p$ ,
- diminuer la vitesse  $\omega_2$  de  $\vec{R}_2$  de la même quantité  $\Omega_p$ ,

car :

$$\theta = + \Omega_p . t$$

$$\omega_1 = \omega + \Omega_p$$

$$\omega_2 = \omega - \Omega_p$$

A cet effet, il faut introduire une force  $f_r$  qui, cette fois, est normale à la trajectoire, donc parallèle au vecteur  $R$  et fournit un travail nul.

La vitesse tangentielle  $v$  est égale à  $\omega . r$ . On peut relever qu'on retrouve ainsi la formule de Coriolis :

$$f_p = 2 m \cdot \Omega_p \omega_r$$

en posant  $m = k/2$

Les forces de précession, étant parallèles aux vecteurs  $\vec{R}_1$  et  $\vec{R}_2$ , peuvent être obtenues par des multiplications simples d'un vecteur  $\vec{V}_1$  ou  $\vec{V}_2$  par un scalaire  $C_p$ , ce qui revient à une modulation ; les contributions, à ajouter aux sorties des multiplieurs 30<sub>1</sub> et 30<sub>2</sub> de la figure 4, peuvent être générées par des opérateurs du genre montré en figure 5. Les multiplieurs 34<sub>1</sub> et 34<sub>2</sub> reçoivent la commande de précession externe  $C_p$ .

Puisqu'on dispose de  $\vec{V}_1$  et  $\vec{V}_2$ , on peut en déduire  $\sin 2\theta$  et  $\cos 2\theta$ , par un produit vectoriel  $\vec{V}_2 \wedge \vec{V}_1 = \sin 2\theta$  et un produit scalaire  $\vec{V}_2 \cdot \vec{V}_1 = \cos 2\theta$ .

Le schéma global des circuits peut être celui donné en figure 6, où les éléments déjà décrits portent le même numéro de référence.

Sur le synoptique de la figure 6, les trajets des signaux analogiques sont indiqués par des lignes simples en traits pleins. Les signaux numériques codés sur n bits sont indiqués par des lignes portant la mention du nombre de bits. Enfin, des lignes doubles indiquent les trajets des couples de valeurs représentatives d'un vecteur, tel que  $\vec{R}_1, \vec{R}_2$ , etc.

On retrouve sur la figure 6 les moyens déjà montrés sur la figure 3, destinés à mesurer et à maintenir l'amplitude de vibration, qui reçoivent, en tant que signaux d'entrée, les sorties des capteurs 16 additionnées ou retranchées, suivant leurs positions relatives. Le rebouclage des VCO comporte un circuit de numérisation. Par composition des signaux numériques ainsi obtenus dans un additionneur 36, on peut obtenir la valeur de  $2\theta$ , d'où  $\theta$  se déduit par simple décalage d'un bit.

Le niveau d'énergie de vibration est ajustable en introduisant la valeur de consigne  $r_0$ , par une commande extérieure, dans les additionneurs 26<sub>1</sub> et 26<sub>2</sub>. Cette valeur de consigne est choisie en fonction des caractéristiques

mécaniques du résonateur.

Les composantes  $fr_1$  et  $ft_1$  sont combinées dans un additionneur double 46<sub>1</sub>. De même les composantes  $fr_2$  et  $ft_2$  sont combinées en 46<sub>2</sub>. La combinaison des valeurs des forces résultantes est effectuée dans un additionneur 50 qui les répartit entre des signaux  $f_1$  et  $f_2$  représentatifs des forces à exercer par les transducteurs 14 et 15.

La figure 6 montre également un opérateur 38<sub>1</sub> de calcul de  $\sin 2\theta$ , par produit vectoriel de  $\vec{V}_1$  et de  $\vec{V}_2$ , et un opérateur 38<sub>2</sub> de calcul de  $\cos 2\theta$ , par produit scalaire de  $\vec{V}_1$  et de  $\vec{V}_2$ .

Enfin, l'appareil montré en figure 6 comporte encore des moyens de génération de la fréquence de résonance  $F_0$ , à partir de  $\vec{V}_1$  et  $\vec{V}_2$ . Ces moyens comportent deux multiplieurs 40<sub>1</sub> et 40<sub>2</sub>. Le multiplieur 40<sub>1</sub> reçoit les signaux représentatifs du vecteur  $\vec{V}_2$  et un signal à une seule composante de rebouclage élaborée par un multiplieur vectoriel 42 et un amplificateur 44. Le multiplieur vectoriel reçoit la sortie des deux multiplieurs 40<sub>1</sub> et 40<sub>2</sub>, ce dernier symétrique de 40<sub>1</sub>.



## REVENDEICATIONS

5        1. Appareil de mesure de rotation autour d'un axe  
sensible comprenant un résonateur mécanique muni de trans-  
ducteurs permettant de créer dans le résonateur une onde  
stationnaire de vibration ayant une symétrie axiale et de  
capteurs de mesure de l'élongation de la vibration du  
10        résonateur dans au moins deux directions particulières et  
comprenant un circuit de contrôle/commande pour entretenir -  
les vibrations et déterminer les emplacements des noeuds et  
des ventres de vibration autour de l'axe,

caractérisé en ce que le circuit de contrôle/commande  
comporte des moyens d'alimentation des transducteurs pour  
15        générer dans le résonateur deux ondes progressives contra-  
rotatives, dont la différence de phase est représentative de  
l'angle de rotation du résonateur autour de son axe de  
révolution et dont les amplitudes sont telles que leur  
composition provoque une onde stationnaire ayant une  
20        amplitude en phase déterminée et une amplitude en quadrature  
sensiblement nulle.

2. Appareil selon la revendication 1, caractérisé en ce  
qu'il comporte au minimum une paire de transducteurs et au  
minimum une paire de capteurs également réparties angulaire-  
25        ment pour créer un réseau d'ondes stationnaires d'ordre  $n$   
supérieur ou égal à  $A$ .

3. Appareil selon la revendication 1 ou 2, caractérisé  
en ce que ledit circuit de contrôle/commande comprend des  
moyens de mesure et d'annulation de déphasage ayant deux  
30        oscillateurs ( $VCO_1, VCO_2$ ) commandés par tension, fournissant  
des signaux carrés d'amplitude unité, et des multiplieurs  
vectoriels ( $20_1, 20_2$ ) fournissant chacun le produit de la  
sortie d'un oscillateur respectif et d'un signal correspon-  
dant provenant des capteurs, dont la sortie attaque l'entrée  
35        de commande de l'oscillateur.

4. Appareil selon la revendication 3, caractérisé en ce

que ledit circuit de contrôle/commande comprend des moyens de mesure des amplitudes des deux ondes et de maintien à une même valeur de consigne ( $r_0$ ), comprenant des additionneurs ( $26_1, 26_2$ ) recevant, sur une entrée additive, la valeur de consigne et, sur l'autre entrée, un signal représentatif du produit scalaire du signal fourni par les capteurs et de la sortie de l'oscillateur commandé correspondant, représentatif de l'amplitude réelle.

5. Appareil selon la revendication 4, caractérisé en ce que les sorties des additionneurs sont envoyées à des multiplieurs ( $30_1, 30_2$ ) et effectuent des multiplications par les sorties des oscillateurs, décalées de  $90^\circ$  par simple inversion des coordonnées et éventuellement changement de signe.

6. Appareil selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit circuit comprend de plus des moyens de commande de précession forcée en vue d'un fonctionnement en gyromètre.

7. Appareil selon la revendication 6, caractérisé en ce que lesdits moyens de commande de précession ont des multiplieurs ( $34_1, 34_2$ ) des sorties des oscillateurs respectifs par un scalaire  $C_p$  représentatif de la précession.

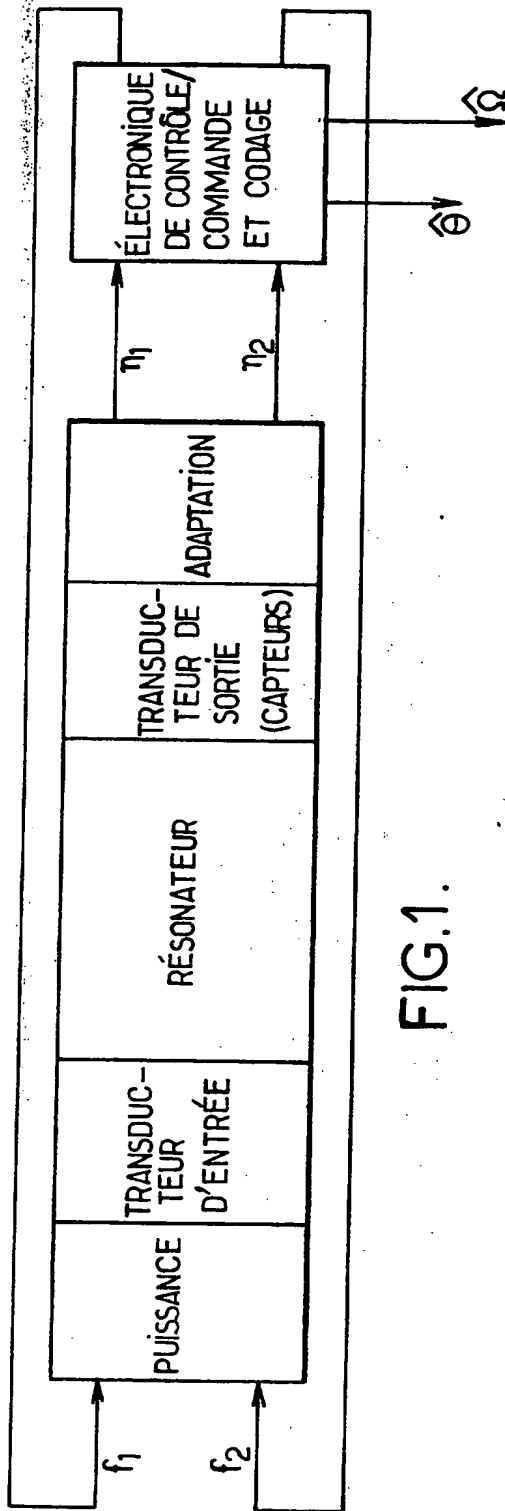


FIG. 1.

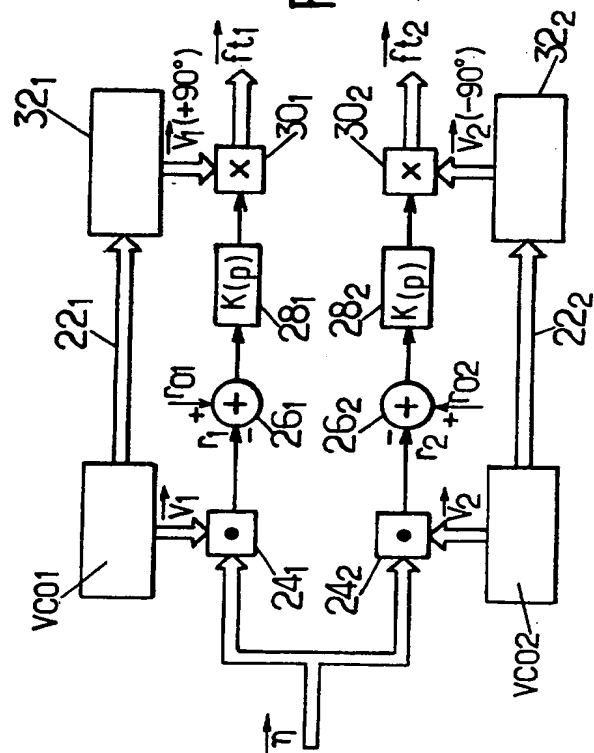


FIG. 4.

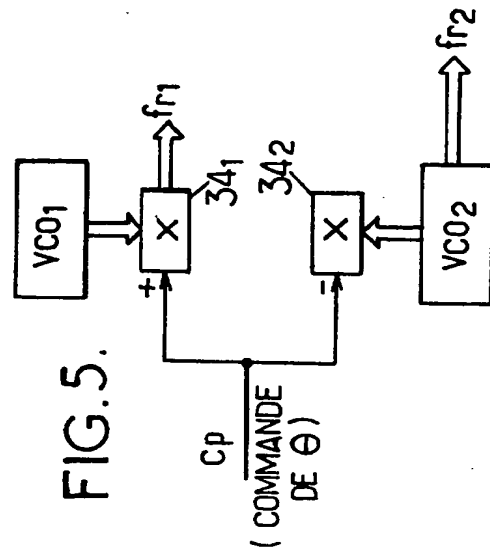


FIG. 5.

2/3

FIG.1A.

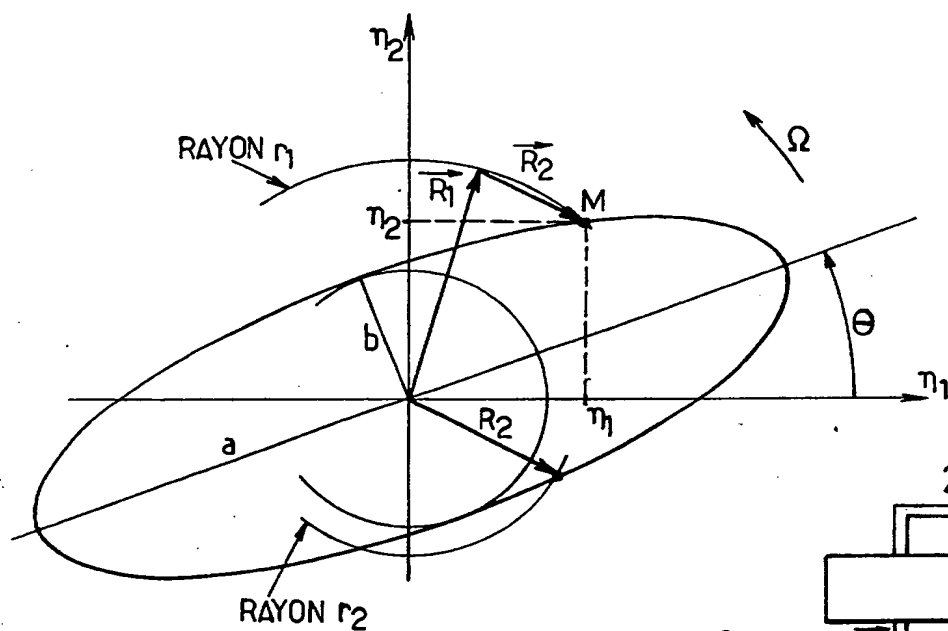
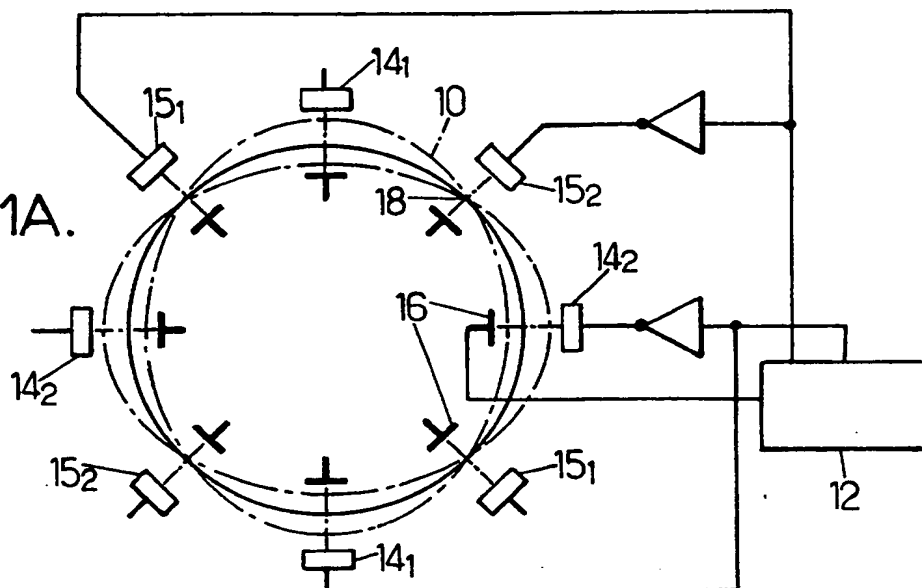
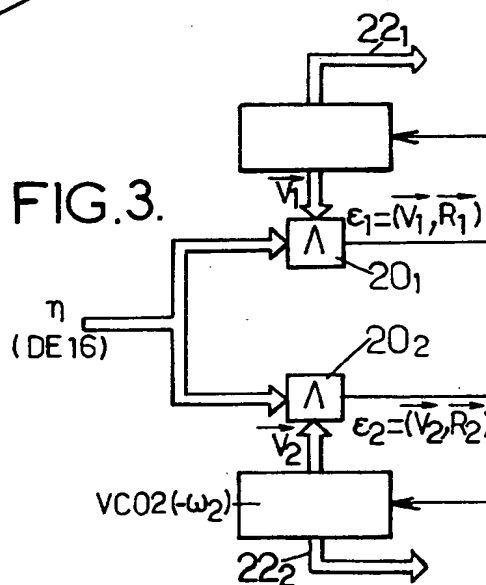


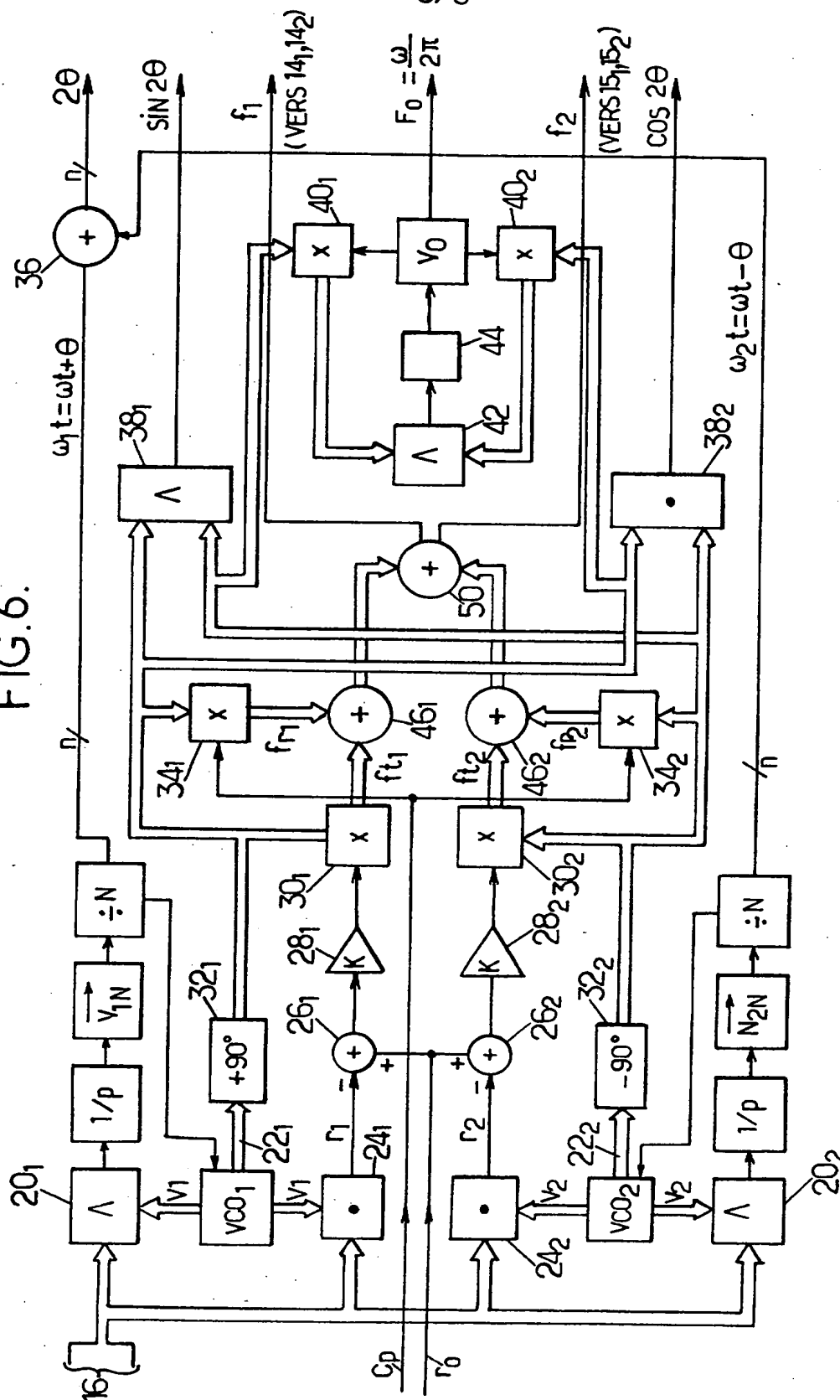
FIG.2.

FIG.3.



3/3

FIG. 6.



REPUBLIQUE FRANÇAISE

**INSTITUT NATIONAL  
de la  
PROPRIETE INDUSTRIELLE**

# RAPPORT DE RECHERCHE PRELIMINAIRE

**établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche**

**2755227**

N° d'enregistrement  
national

FA 537112  
FR 9613344

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		Revendications concernées de la demande examinée
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	
X,D	EP 0 609 929 A (GEN MOTORS CORP) 10 Août 1994 * abrégé; revendications 1,3 *	1,2
A	EP 0 472 424 A (BRITISH AEROSPACE) 26 Février 1992 * colonne 10, ligne 22 - ligne 51 *	1-5
A	FR 2 723 635 A (SAGEM) 16 Février 1996 * abrégé; revendication 1 *	6,7
		DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int.CL.6)
		G01C
Date d'achèvement de la recherche		Examinateur
30 Juin 1997		Hunt, J
<p><b>CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES</b></p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul  Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie  A : pertinent à l'encontre d'au moins une revendication ou arrière-plan technologique général  O : divulgation non-écrite  P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention  E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.  D : cité dans la demande  L : cité pour d'autres raisons</p> <p>&amp; : membre de la même famille, document correspondant</p>		